



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2017.03.022

刘祖强, 赵鑫, 粟玉英, 等. 南水北调中线工程强膨胀岩渠基回弹监测分析与变形模型[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(3): 132-138. LIU Ziqiang, ZHAO Xin, SU Yuying, et al. Monitoring analysis and deformation model of the resilience of strong expansive rock canal base in South to North Water Transfer Project[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(3): 132-138. (in Chinese)

# 南水北调中线工程强膨胀岩渠基回弹监测分析与变形模型

刘祖强, 赵鑫, 粟玉英, 伍博, 杨晓峰

(长江岩土工程总公司(武汉), 武汉 430010)

**摘要:** 研究渠道开挖过程中渠基回弹变形规律, 对渠道底板施工具有指导意义。通过采用改进的分层沉降仪配磁感应沉降环方法, 实测渠道二次开挖引起的渠基最大回弹量为 102 mm, 建立了回弹变形模型, 定量分析了各影响因子对回弹变形的贡献度。结果显示: 开挖卸荷是产生渠基回弹变形的主要影响因素, 约占总回弹量的 74%。渠道底板在 2013 年 12 月封闭后的 5 个月时间里, 由时间效应引起的渠道底板回弹量仅为 2.43 mm, 对渠道底板结构影响不大, 有利于渠道的安全运行。

**关键词:** 渠基回弹; 监测分析; 变形模型; 南水北调; 强膨胀岩

**中图分类号:** P642 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2017)02-0132-07

## Monitoring analysis and deformation model of the resilience of strong expansive rock canal base in South to North Water Transfer Project

LIU Ziqiang, ZHAO Xin, SU Yuying, WU Bo, YANG Xiaofeng

(Changjiang Geotechnical Engineering Corporation, Wuhan 430010, China)

**Abstract:** The study on the resilience deformation rule of canal base in the process of canal excavation has a guiding significance to the canal floor construction. With the improved layered settlement instrument equipped with induction ring, we measured the maximum resilience of the canal base caused by secondary canal excavation to be 102 mm, and established a resilience deformation model, and analyzed quantitatively the contribution degree of each impact factor to the resilience deformation. The results showed that the excavation unloading was the main impact factor of canal base resilience deformation, accounting for about 74% of the total resilience. The canal floor resilience caused by time effect was only 2.43 mm in 5 months after being closed in December 2013. It had little influence on the floor structure, and was conducive to the safe running of the canal.

**Key words:** canal base resilience; monitoring analysis; deformation model; South to North Water Transfer Project; strong expansive rock

南水北调中线工程涉及膨胀土(岩)渠段累计长度约 380 km, 其中挖方渠道渠基多揭露中、强膨胀土(岩), 渠基膨胀土的卸荷回弹和自身湿胀干缩变形将对渠道防渗体系和衬砌板的施工和运行产生不利影响。因此, 渠道施工期对渠基卸荷回弹的监测

具有重要工程意义和研究价值。

选定的渠基回弹监测断面位于南水北调中线一期工程南阳三标桩号 TS106 渠段。该段地层结构为: 上部由中更新统冲洪积棕黄色黏土(al<sup>1</sup>p1Q<sub>2</sub>)组成, 含钙质结核(姜石)和铁锰质结核, 具有弱~中等

收稿日期: 2016-08-20 修回日期: 2017-03-25 网络出版时间: 2016-11-18  
网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.tv.20161118.1629.002.html>

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划(2011BAB10B02)

Fund: 12th Five Year National Science and Technology Support Program(2011BAB10B02)

作者简介: 刘祖强(1963-), 男, 湖北宜昌人, 教授级高级工程师, 注册测绘师, 主要从事工程测量与安全监测等方面研究。E-mail: liuzq@srna.com

膨胀性;下部主要为上第三系浅棕黄色夹灰绿色黏土岩(N)组成,黏土岩具强膨胀性,大裂隙及长大裂隙极发育。该段渠道挖深12~18 m,该渠段设计流量 $330\text{ m}^3/\text{s}$ ,渠底宽21 m,一级马道以下边坡系数为2.0,以上为1.75,设计渠水深7.5 m,加大设计渠水深8.24 m。

渠基回弹监测采用分层沉降仪配磁感应沉降环进行。并利用渠基回弹监测数据,建立了渠基回弹变形模型,说明渠道开挖卸荷是产生渠基回弹变形的的主要影响因素。

## 1 渠基回弹监测

### 1.1 监测布置

采用改进的CFG-40型分层沉降仪配电磁感应沉降环测定渠基膨胀岩的分层回弹量。把预连接在专用塑料管外的电磁沉降环,连同塑料管一起安装在渠道中线位置和左、右侧渠底角的位置的3个钻孔内(见图1),每个孔内布设6个电磁沉降环,安装高度分别在渠道最低开挖面以下0.5 m、1 m、2 m、3 m、5 m和20 m的位置,其中,20 m处电磁沉降环监测点为回弹监测参考基准点。

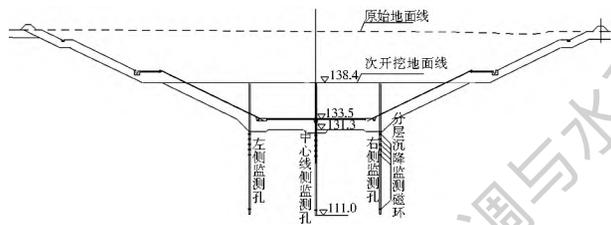


图1 渠基回弹监测孔布置

Fig. 1 Arrangement of canal base resilience monitoring holes

### 1.2 回弹监测原理<sup>1</sup>

回弹监测原理示意图2,用钻机在预定孔位上钻孔1,孔深按设计文件要求的预连接的塑料管长度而定,孔径一般110 mm能恰好放入感应电磁环5为佳。然后放入塑料管,塑料管2连接时要用内接头或套接式螺纹,使外壳光滑,不影响感应电磁环5的上、下移动。在塑料管2下孔前将感应电磁环5按设计距离安装在塑料管2上,感应电磁环5之间可利用上定位环3和下定位环4进行隔离,成孔后将带感应电磁环5的塑料管2插入孔内。感应电磁环5在上定位环3受阻后被迫随塑料管2送至设计标高,此时感应电磁环5上的三个铁爪插入土壁中,固定在设计标高。然后将塑料管2向上拔起350 mm,这样可使感应电磁环5位移上定位环3和下定位环4之间,上、下各350 mm左右范围内移动时不受阻,然后用细砂在塑料管2和孔壁之间进行填

充至管口标高。按照此方法安装沉降磁环,使得感应电磁环5可随土层上下移动。将最深处的感应电磁环5作为基准磁环,塑料管2上部的感应磁环与最深处感应磁环之间的距离变化量即为上部磁环的沉降及回弹量,从而观测出土层的沉降及回弹量。另外在观测时使用温度计9以固定距离读数的方式测出塑料管2温度,然后对观测钢尺8进行温度改正,使所观测长度数据达到更高的精度。

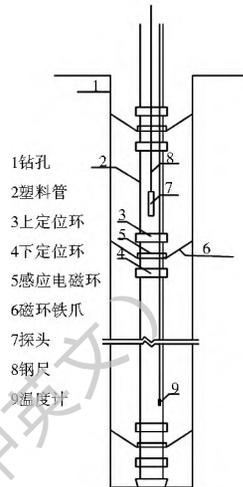


图2 回弹监测原理示意图

Fig. 2 Schematic diagram of resilience monitoring

### 1.3 回弹观测情况

电磁沉降环方法采用了改进的CFG-40型分层沉降仪配磁感应沉降环进行观测,为确保测量精度,除替换原测尺为标准钢尺外,观测时,还需要记录孔内温度,用于钢尺的温度和尺长等各项改正计算,改进后的测量精度优于 $\pm 1\text{ mm}$ 。分层沉降首次观测时间为2012年8月10日,每月观测2次,开挖期间进行了加密观测。由于右岸滑坡等原因,位于右侧的1套电磁沉降环在2013年8月毁坏;其余2套电磁沉降环,在2014年6月渠道过水试验前,停止观测。

## 2 强膨胀岩渠基回弹分析

### 2.1 左侧渠基和渠坡交界处不同高程回弹分析

左侧渠基回弹监测有效测点为HS01、HS02、HS03和HS05,测点高程实际分布在渠道最低开挖面以下0.6 m、1.1 m、2.1 m和5.0 m。回弹分析如下(图3)。

(1) 截至2013年3月22日二次开挖前。距首次观测224 d,各测点均表现为回弹,回弹量分别为:4.11 mm、5.06 mm、5.70 mm和5.20 mm,日均回弹量为0.02 mm。

(2) 二次开挖期。在2013年3月22日至2013

<sup>1</sup> “地基分层垂直位移监测装置”获得国家知识产权局实用新型专利授权。

年 3 月 28 日 6 天时间, 渠道挖深 6 m 多, 回弹量分别为: 2.09 mm、2.19 mm、1.12 mm 和 1.12 mm, 日均回弹量为 0.27 mm。回弹量不大的主要原因可能是由开挖方式决定的, 因为渠道开挖是先从渠道中心线附近开始, 两则渠角处卸荷不大, 加之渠坡限制了两则渠底角的回弹。

(3) 二次开挖期后至渠坡和渠底施工期间。2013 年 3 月 28 日至 2013 年 12 月 28 日, 共计 275 d, 各测点回弹量分别为: 20.85 mm、14.40 mm、10.86 mm 和 8.58 mm, 日均回弹量为 0.05 mm。期间渠坡分别于 2013 年 4 月 20 日和 2013 年 5 月

28 日发生二次滑坡, 滑坡产生的堆积土体也限制了左侧渠底的回弹。随后滑坡治理、2013 年 10 月底至 2013 年 11 月中旬渠底换填层碾压施工、2013 年 12 月渠底封闭等施工, 造成渠基回弹变形过程的波动, 但是未改变渠基回弹变形的基本特征。

(4) 渠底封闭后: 2013 年 12 月 28 日至 2014 年 6 月 3 日, 共计 157 d。各测点分别回弹了 11.20 mm、13.70 mm、10.25 mm 和 16.45 mm, 日均回弹量为 0.08 mm。

(5) 截止 2014 年 6 月 3 日测孔封闭, 实测左侧渠底和渠坡交界处累计最大回弹量为 38.25 mm。

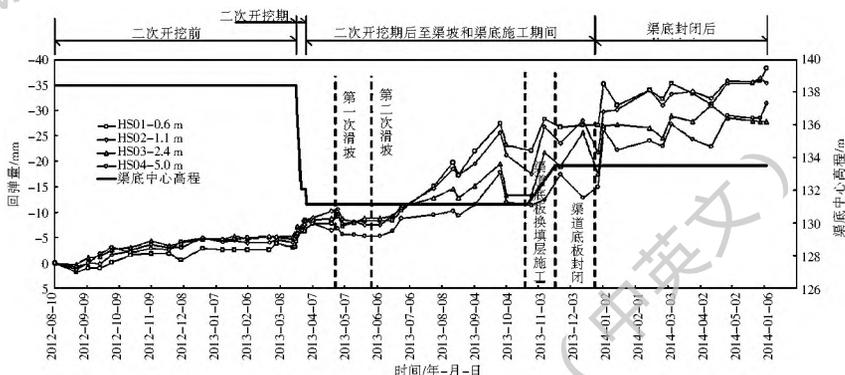


图 3 左侧渠底和渠坡交界处不同高程回弹过程线

Fig. 3 Resilience process at different heights at the junction between the left-side canal bottom and the slope

## 2.2 右侧渠基和渠坡交界处不同高程回弹分析

右侧渠基回弹监测点为 HS13、HS14、HS15、HS16 和 HS17, 测点高程实际分布在渠道最低开挖面以下 0.3 m、0.8 m、1.8 m、2.8 m 和 4.7 m。回弹分析见图 4。

(1) 截至 2013 年 3 月 22 日二次开挖前: 距首次观测 224 d, 各测点均表现为回弹, 回弹量分别为: 4.56 mm、4.86 mm、5.85 mm、5.30 mm 和 5.55 mm, 日均回弹量为 0.02 mm, 与左侧一致。

(2) 二次开挖期。在 2013 年 3 月 22 日至 2013 年 3 月 28 日, 6 天时间, 渠道挖深 6 m 多, 回弹量分

别为: 1.94 mm、2.32 mm、1.65 mm、1.45 mm 和 0.87 mm, 日均回弹量为 0.27 mm, 也同左侧一致。

(3) 二次开挖期后至渠坡和渠底施工期间。2013 年 3 月 28 日至 2013 年 8 月 20 日, 共计 145 d, 各测点回弹量分别为: 5.30 mm、5.55 mm、6.70 mm、4.60 mm 和 5.65 mm, 日均回弹量为 0.04 mm。期间渠坡分别于 2013 年 3 月 30 日和 2013 年 6 月 5 日发生二次滑坡。右侧渠基的回弹规律与左侧基本一致。

(4) 截止 2013 年 8 月 20 日测孔毁坏, 实测右侧渠底和渠坡交界处累计最大回弹量为 16.24 mm。

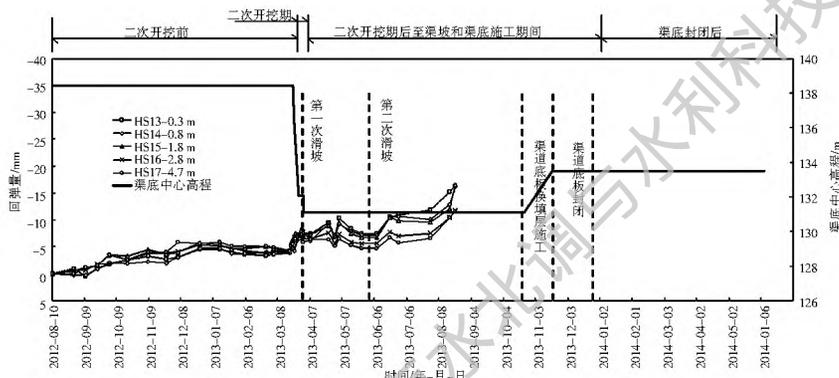


图 4 右侧渠底和渠坡交界处不同高程回弹过程线

Fig. 4 Resilience process at different heights at the junction between the right side canal bottom and the slope

### 2.3 渠道中心线处渠基不同高程回弹分析

渠道中心线处回弹监测有效测点为 HS07 和 HS09,测点高程实际分布在渠道最低开挖面以下 0.5 m 和 2.3 m。回弹分析见图 5。

(1) 截至 2013 年 3 月 22 日二次开挖前。测点均表现为回弹,距首次观测 224 d 里累计回弹量分别为:14.91mm 和 13.30 mm,日均回弹量为 0.06 mm,明显较两侧回弹量大。

(2) 二次开挖期间。2013 年 3 月 22 日至 2013 年 3 月 28 日,6 天时间,渠道挖深 6 m 多,测点 HS07 和 HS09 回弹量分别为 63.08 mm 和 64.14 mm,日均回弹量较大为 10.60 mm。由于强膨胀岩的超固结性,表现出了超强的快速回弹释放特征。

(3) 二次开挖期后至渠底施工期间。2013 年 3

月 28 日至 2013 年 12 月 28 日,共计 275 d,测点 HS07 和 HS09 分别回弹了 18.50 mm 和 16.95 mm,日均回弹量为 0.06 mm。期间 2013 年 10 月底至 2013 年 11 月中旬渠底换填层碾压和 2013 年 12 月渠底封闭等施工对渠基的回弹影响较小,渠基仍然表现一定的回弹变形特征,且回弹曲线波动变化明显小于左、右两侧渠底角。

(4) 渠底封闭后。2013 年 12 月 28 日至 2014 年 6 月 3 日,共计 157 d。测点 HS07 和 HS09 分别回弹了 5.50 mm 和 6.10 mm,日均回弹量仅为 0.04 mm,结合左侧渠底角的回弹监测结果,说明渠底回弹已趋于稳定。

(5) 截止 2014 年 6 月 3 日测孔封闭,实测中心线附近渠基累计最大回弹量为 101.99 mm。

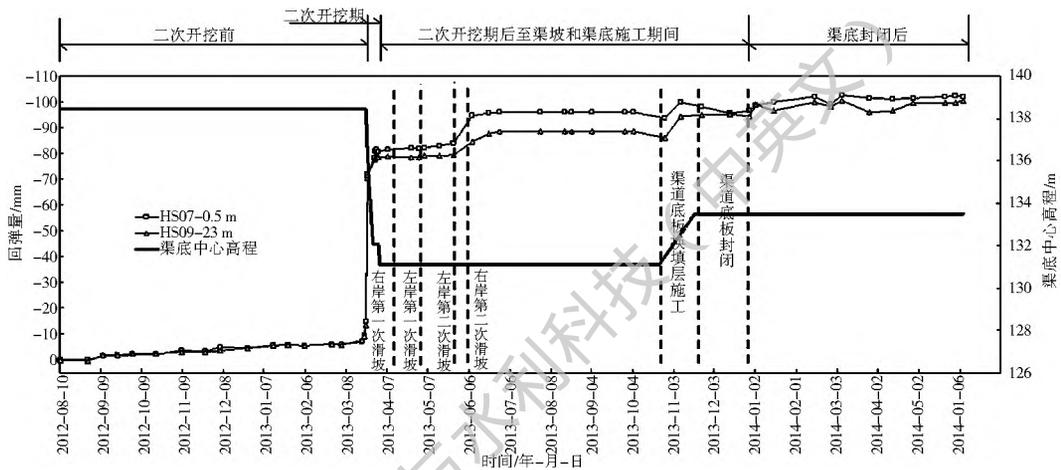


图 5 中心线渠基不同高程回弹过程线

Fig. 5 Resilience process at different heights at the centerline of canal base

### 2.4 渠基回弹分布分析

(1) 横断面分布。渠基左侧、中心线、右侧不同时间段的回弹分布情况见图 6。2013 年 3 月 22 日二次开挖前,中心线附近渠基的回弹量是左侧的 1.7 倍右侧的 1.8 倍;二次开挖后,2013 年 3 月 28 日实测中心线附近渠基的回弹量是左侧的 11.6 倍右侧的 11.3 倍;2013 年 8 月 20 日测得中心线附近渠基的回弹量是左侧的 6.8 倍右侧的 6.4 倍,表现出明显下降态势;之后稳定在 3.1 到 3.7 倍之间。

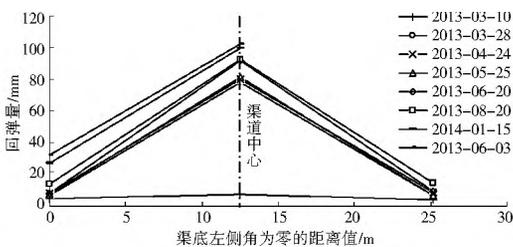


图 6 渠基左侧、中心线、右侧回弹分布

Fig. 6 Resilience distribution at the left side, centerline, and right side of canal base

(2) 竖向分布。由于左侧测点回弹数据较完整,绘制了渠基左侧不同高程测点回弹分布见图 7。表现出越接近开挖面的测点回弹量越大。由于 HS01 测点和 HS05 测点高程差 4.4 m,二次开挖前,两个测点的回弹量基本一致,2013 年 3 月 27 日二次开挖基本结束后,两个测点产生了明显的回弹差异,2014 年 1 月后,回弹差异基本稳定在 6.2~9.9 mm 之间,至 2014 年 6 月 3 日,HS01 测点和 HS05 测点累计回弹量分别为 38.25 mm 和 31.34 mm,回弹差为 6.9 mm,根据相似三角形原理推算,并假设渠基强膨胀岩构造均匀,依据两个测点回弹差估算结果表明,在渠基高程 106.13 m 处是二次开挖回弹的零点,比我们预先设计的基准测点高程 111.67 m 低了 5.54 m。可以认为在渠底板高程 133.5 m (渠基换填层底部开挖高程约 131.3 m) 以下 21.83 m 的基准测点 HS06(高程 111.67 m)也可能存在一定回弹变形。此外,由于二次开挖深度大约在 7m 左右,开挖引起回弹的零点在开挖面以下 25 m,是开

挖深度的 3 5 倍左右。

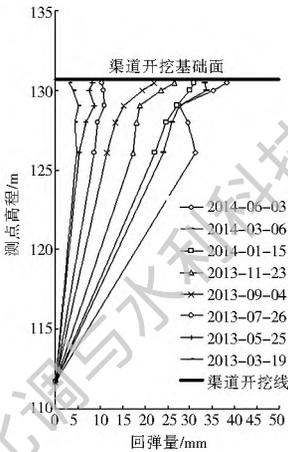


图 7 渠基左侧不同高程测点回弹分布

Fig. 7 Resilience distribution at monitoring points of different heights at the left side of canal base

### 3 强膨胀岩渠基回弹变形模型

#### 3.1 强膨胀岩胀缩特性和固结压力特性

强膨胀岩由于自身的内在因素,其胀缩性指标均较非膨胀岩有所不同,但是就渠底开挖回弹变形而言,其胀缩特性对其的影响远小于超固结性。

##### 3.1.1 强膨胀岩的胀缩特性

膨胀岩的膨胀与收缩是由于膨胀岩体内的粘土矿物吸附、释放水分子后产生的结果。与胀缩性相关的指标主要有自由膨胀率、无荷膨胀率、膨胀力、不同压力下的膨胀率以及收缩率等,通过研究这些指标,可以深入地认识岩体的胀缩特性,从而为膨胀岩地区渠道的回弹变形等研究提供理论基础。

渠基回弹监测桩号附近强膨胀岩胀缩特性指标成果见表 1、表 2。

表 1 强膨胀岩膨胀性指标统计

Tab. 1 Swelling indexes of strong expansive rock

自由膨胀率 $\delta_{ef}$ (%)	无荷膨胀率 $\delta_e$ (%)	不同起始压力膨胀率 $\delta_{ep}$ (%)						膨胀力 / kPa	
		压力 / kPa						垂直 $P_c$	侧向 $P_c$
		0	25	50	100	150	200		
94	1.6	1.6	0.5	0.1	0.9	1.5	2.6	58.3	38.6

表 2 强膨胀岩收缩性指标统计

Tab. 2 Shrinkage indexes of strong expansive rock

缩限 $w_s$ (%)	收缩系数 $\lambda$	线缩率 $\delta_s$ (%)	体缩率 $\delta_v$ (%)
9.2	0.538	7.91	22.13

强膨胀岩膨胀性: 试验测定渠基强膨胀岩自由膨胀率( $\delta_f$ )达到 94%,说明岩体黏粒含量高,矿物亲水性超强,在开挖卸荷后遇降雨,会加大渠基的回

弹量。渠基原状膨胀岩体在仅有侧限的条件下,饱水后垂直方向的膨胀率  $\delta_v$  较小为 1.6%,说明岩体浸水饱和过程中整体膨胀潜势不大。样本强膨胀岩垂直膨胀力为 58.3 kPa,根据南水北调中线工程沿线统计的非膨胀性新近系 N 黏土岩,其垂直膨胀力为 23.7 kPa,较非膨胀岩而言,强膨胀岩在卸荷开挖时由于膨胀力产生的回弹变形其实并不明显。不同压力下的膨胀率( $\delta_p$ )是指膨胀岩在不同垂直压力下饱水后的膨胀率。当垂直压力为 0 kPa、25 kPa 时,试样呈膨胀状态;垂直压力达到 50 kPa 时,试样出现压缩状态。即上部压力完全释放,其膨胀率仅为 1.6%,就渠底开挖回弹变形来说,其影响较小。

强膨胀岩收缩性: 收缩性主要受初始含水率、膨胀性、岩体结构等因素的影响,如自由膨胀率、初始含水率越小,则其线缩率和体缩率就越小。试验测定的样本各项指标均不大,对渠基卸荷回弹来说,对其影响不大,而且是反方向的。

#### 3.1.2 强膨胀岩固结压力特性

强膨胀岩前期固结压力试验的试样取自渠基回弹监测桩号附近,取样高程 133 m、134 m,前期固结压力试验统计见表 3。

表 3 强膨胀岩前期固结压力统计

Tab. 3 Previous consolidation pressure of strong expansive rock

高程 / m	比重 $G_s$	含水率 $w$ (%)	湿密度 $\rho$ / (g · cm <sup>-3</sup> )	干密度 $\rho_d$ / (g · cm <sup>-3</sup> )	孔隙比 $e$	饱和度 $S_r$ (%)	前期固结压力 $P_c$ / kPa
133	2.74	25.9	1.88	1.50	0.832	86	317.4
134	2.75	24.6	1.92	1.54	0.782	87	476.6

样本处原始地面高程 147 m 左右,133 m 高程试样埋深 14 m,上覆土重  $P_0 = 19.4 \times 14 = 271.6$  kPa;134 m 高程试样埋深 13 m,上覆土重  $P_0 = 19.9 \times 13 = 258.7$  kPa。前期固结压力  $P_c >$  目前上覆岩体自重压力  $P_0$ ,说明该段强膨胀岩具有超固结性。主要表现为历史卸荷作用导致岩体经受过固结压力大于现有的土重压力,所以在膨胀岩渠道开挖过程中,将产生比非膨胀性黏土岩更加显著的回弹效应(见图 5)。

### 3.2 回弹变形模型及因子选取

#### 3.2.1 回弹变形数学模型

选取渠道最低开挖面以下 0.5 m 左右的监测点代表的渠道中心线附近渠基的回弹观测值系列来建立变形模型,以定量分析强膨胀岩渠基的回弹变形与影响因子间的关系。

将渠基回弹变形体当做一个系统,将各目标点上所获取的回弹量作为系统的输出,将影响变形体

的各种因子作为系统的输入,将输入称自变量,输出称因变量。通过对它们均进行长期的观测,则可以用回归分析方法近似地估计出因变量与自变量,即回弹变形与影响因子之间的函数关系。根据这种函数关系可以解释变形产生的主要原因,也可以进行预报。

多元回归函数模型:

$$y = x\beta + \varepsilon \text{ 或 } y + v = x\beta \quad (1)$$

$y$  为因变量即回弹变形观测值向量  $y^T = (y_1, y_2, \dots, y_n)$ ,  $n$  为观测值个数;  $\varepsilon$  为观测值误差向量,  $x$  为  $n(m+1)$  阶矩阵。

$$X = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1m} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{nm} \end{bmatrix} \quad (2)$$

表示有  $m$  个变形影响因子,  $\beta$  是回归系数向量,  $\beta^T = (\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_m)$ , 在  $n > m + 1$  时,按最小二乘原理可得法方程组并解出回归系数及其精度。

### 3.2.2 回弹影响因子选择

强膨胀岩渠基回弹主要是由渠道二次开挖、膨胀因子、温度因子和时效因子等影响因子作用。

(1) 开挖因子  $X_1$ 。

由于强膨胀岩固结压力特性超强,因此,膨胀岩渠基在卸荷开挖( $x_{11}$ )后,会产生较大回弹,从而导致强膨胀岩渠基在垂直方向抬升。可用以下函数表示开挖因子

$$y_1 = x_{11}\beta_1 \quad (3)$$

式中:  $x_{11}$  可取单位时间的开挖高度来表示(本文取值),或者用文献[8]对数函数的倒数进行拟合。

(2) 胀缩因子  $X_2$ 。

渠基强膨胀岩的强胀缩特征,在开挖卸荷后遇降雨,会加大渠基的垂直回弹量,失水会相对收缩,减小回弹。可以用大气降雨和土体含水率来模拟胀缩因子,因为强膨胀岩在大气降雨( $x_{12}$ )作用下会引起岩体含水率( $x_{13}$ )增大,从而也会导致强膨胀土渠道顶部在垂直方向膨胀隆起,而晴天会失水收缩。因此,可用以下函数表示膨胀因子

$$y_2 = x_{12}\beta_2 + x_{13}\beta_3 \quad (4)$$

式中:  $x_{12}$  可取单位时间的降雨量或降雨量平方或降雨量立方;  $x_{13}$  可取单位时间的土体平均含水率或含水率平方或含水率立方。经过多次计算分析,最后选入模型的因子是月降雨量。

(3) 温度因子  $X_3$ 。

由于大气温度( $x_{14}$ )变化会引起土体温度变化或者土体温度( $x_{15}$ )滞后于气温的变化,会引起含水

率的变化,同样会引起强膨胀土渠顶在垂直方向的变形,可用以下函数表示温度因子

$$y_3 = x_{14}\beta_4 + x_{15}\beta_5 \quad (5)$$

式中:  $x_{14}$  可取单位时间的平均气温或者滞后  $n$  个单位的平均气温;  $x_{15}$  可取单位时间的土体平均温度或者滞后  $n$  个单位的土体平均气温。通过计算分析和比较,选入模型的因子是月平均气温。

(4) 时效因子  $X_4$ 。

在开挖结束后,强膨胀岩渠基回弹随时间效应( $x_{16}$ )存在一定的回弹量,可用以下函数表示

$$y_4 = x_{16}\beta_6 \quad (6)$$

式中:  $x_{16}$  可根据位移趋势分析,取对数函数或指数函数等。本文取对数函数  $\ln(t+1)$  计算结果最优。

### 3.2.3 回弹变形模型拟合及分析

由分析知,渠基回弹变形模型可用下式表达:

$$Y = X_1\beta_1 + X_2\beta_2 + X_3\beta_3 + X_4\beta_4 + \varepsilon \quad (7)$$

式中:  $\varepsilon$  为误差项,根据需要还可以设置常数项,并对入选因子进行必要优化选取进入变形模型。

按上述方法建立建立的渠基回弹模型如下:

$$Y = 12.634469X_1 - 0.160252X_2 + 0.245552X_3 + 9.057592X_4 - 23.760554 \quad (8)$$

复相关系数为 0.999,标准误差为 3.621,模型拟合残差均在  $\pm 2$  倍标准误差置信区间内,从而说明变形模型拟合精度良好。

依据式(8)垂直位移模型,计算模型拟合值和残差序列(见图8),计算膨胀因子、温度因子和时效因子分量序列(见图9)。渠基回弹分析如下。

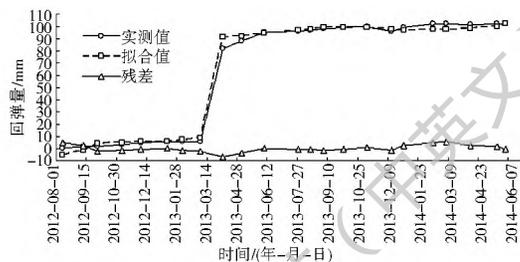


图8 渠基回弹实测值、模型拟合值和残差过程线

Fig. 8 Measured values, model fitting values, and residuals of canal base resilience

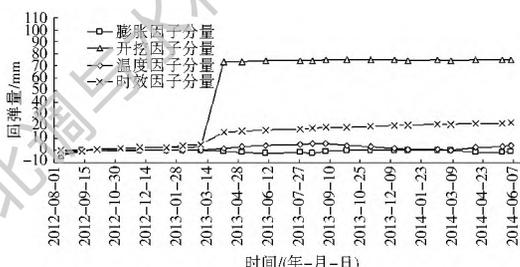


图9 渠基回弹影响因子分量过程线图

Fig. 9 Component of the impact factors of canal base resilience

(1) 从式(8)分析, 监测点 HS07 所代表的渠道中心线附近渠基的回弹量与开挖量因子、温度因子和时效因子正相关, 与膨胀因子相关性较弱, 回弹规律符合实际情况。

(2) 渠道开挖因子影响范围在  $-3.53 \sim 75.39$  mm 之间, 说明渠道二次开挖引起的最大回弹量达到 75.39 mm, 约占总回弹量的 74%。

(3) 膨胀因子影响范围在  $-1.96 \sim 0.16$  mm 之间, 影响较小的原因是渠基在地表以下, 二次开挖前上部覆盖较厚, 二次开挖后不久, 渠道换填层施工和渠底面板封闭后, 几乎没有雨水入渗。

(4) 温度因子影响在  $-1.82 \sim 5.84$  mm 之间, 表明温度因子引起的强膨胀岩土垂直方向最大回弹量为 5.84 mm, 约占总回弹量的 4%。

(5) 时效因子呈现缓慢回弹态势, 影响最大为 23.06 mm, 约占总回弹量的 22%。最近 1 年回弹量为 5.71 mm, 特别是渠道底板在 2013 年 12 月封闭后, 渠道底板回弹量仅为 2.43 mm。

## 4 结语

(1) 提出的分层沉降仪配磁感应沉降环测定渠基回弹方法(已获国家专利 ZL 2015 2 0102581. X), 具有一定实用推广价值。

(2) 强膨胀岩渠基回弹主要是渠道开挖卸荷引起, 由于强膨胀岩的超固结性, 二次开挖期间, 渠基回弹量最大为 63.08 mm, 约占实测累计回弹量 102 mm 的 61%。2013 年 12 月 28 日渠道底板封闭以来至 2014 年 6 月 3 日, 渠基回弹量仅为 5.50 mm。

(3) 渠基中心线处的回弹量大于左侧和右侧渠基和渠坡交界处, 二次开挖后, 实测中心线附近渠基的回弹量是左侧的 11.6 倍右侧的 11.3 倍, 之后随着时间的变化, 逐步稳定在 3.1~3.7 倍之间。

(4) 根据不同深部的回弹量差值分析计算, 渠道开挖引起的强膨胀岩渠基回弹的零点高程约 106 m, 由于渠道最低开挖面高程约 131 m, 因此, 开挖引起回弹的零点在最低开挖面以下 25 m 左右, 是开挖深度 7 m 的 3.5 倍左右。因此, 建议以后在进行类似地基回弹监测时, 应考虑在开挖深度的 3.5 倍的位置设置参考基准点。

(5) 渠基回弹变形模型分析计算表明, 中心线附近渠基的回弹量与开挖量因子、温度因子和时效因子正相关, 与膨胀因子相关性较弱, 回弹规律符合实际情况。

### 参考文献(References):

[1] 刘祖强. 地基分层垂直位移监测装置: 中国, ZL 2015 2

0102581. X [P], 2015-06-24. (LIU Zur qiang. Vertical displacement monitoring device of ground layer: China, ZL 2015 2 0102581. X [P], 2015 06 24. (in Chinese))

[2] 刘祖强, 蔡习文, 张占彪, 等. 膨胀土(岩)渠坡位移监测分析与预警[J]. 人民长江, 2015, 46(8): 74-78. (LIU Zhur qiang, CAI Xi wen, ZHANG Zhanbiao, et al. Expansive soil (rock) canal slope displacement monitoring and early warning of analysis [J]. The People of the Yangtze River, 2015, 46(8): 74-78. (in Chinese))

[3] 刘祖强, 吕笑, 龚文慈, 等. 膨胀土(岩)渠坡自动化综合监测系统研究[J]. 人民长江, 2014, 45(7): 31-35. (LIU Zhur qiang, LU xiao, GONG Wen ci, et al. Expansive soil (rock) canal slope integrated automation monitoring system [J]. The People of the Yangtze River, 2014, 45(7): 31-35. (in Chinese))

[4] 刘祖强, 张正禄等著. 工程变形监测分析预报的理论与实践[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008. 12. (LIU Zur qiang, ZHANG Zhenglu, et al. Theory and practice of engineering deformation monitoring and analysis [M]. Beijing: China Water Conservancy and Hydropower Press, 2008. 12. (in Chinese))

[5] 张军, 刘祖强等著. 滑坡监测分析预报的非线性理论和方法[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010. 10. (ZHANG Jun, LIU Zur qiang et al. The nonlinear theory and method of landslide monitoring and analysis [M]. Beijing: China Water Conservancy and Hydropower Press, 2010. 10. (in Chinese))

[6] 刘特洪, 包承纲. 刁南灌区膨胀土滑坡的监测和分析[J]. 土工基础, 1994(2): 1-7. (LIU Te hong, BAO Cheng gang. The Southern Irrigation expansive soil landslide monitoring and analysis of [J]. Soil Foundation, 1994(2): 1-7. (in Chinese))

[7] 赵鑫, 阳云华, 朱琰洁, 等. 裂隙面对强膨胀土抗剪强度影响分析[J]. 岩土力学, 2014, 35(1): 136-139. (ZHAO Xin, YANG Yur hua, ZHU Ying jie et al. Analysis of the effect of the crack on the shear strength of the expansive soil [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(1): 136-139. (in Chinese))

[8] 马千里. 非饱和膨胀土卸载回弹特性经验模型研究[J]. 黑龙江科技信息, 2011(15): 26. (MA Qian li. Unsaturated Expansive Soil Unloading characteristics of [J]. Model of Heilongjiang Science and Technology Information, 2011(15): 26. (in Chinese))

[9] 孙俊岭. 软土地区基坑回弹对工程桩的影响分析研究[J]. 铁道工程学报, 2011(10): 46-52. (SUN Jun ling. Analysis and research on the influence of foundation pit rebound in soft soil area on engineering piles [J]. Journal of Railway Engineering, 2011(10): 46-52. (in Chinese))

[10] 严伯铎. 基坑回弹监测的方法及应用 [J]. 勘察科学技术, 2005(4): 45-50. (YAN Bor duo. Method for monitoring the foundation pit rebound and the application of [J]. Survey Science and Technology, 2005(4): 45-50. (in Chinese))

[11] 张建坤, 陈昌彦. 基坑回弹监测的方法及应用 [J]. 测绘通报, 2014(S1): 70-72. (ZHANG Jian kun, CHEN Chang yan, foundation pit rebound monitoring method and application [J]. mapping, 2014(S1): 70-72. (in Chinese))